Vol.11, No.4, Winter 2023, pp.43-68 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.74202.1143 Open access

Evaluating and Zoning Subsidence Risk using MABAC and ANP Adaptive Algorithm (Case Study: Ardabil Plain)

Mousa Abedini[a*], Leila Aghayary[b], Sayyad Asghari Saraskanrood[c]

[a] *Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[b] *PhD in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[c] *Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

***Received:* 14 January 2022** ***Revised:* 22 May 2022** ***Accepted:* 25 June 2022**

Abstract

One of the dangers facing Iran's plains is subsidence. Land subsidence due to various reasons, such as over-harvesting of underground water sources and climate changes, has caused many problems in agricultural lands, roads, and power and energy transmission lines. Therefore, it is important to deal with the causes and influencing factors to control the risks. Ardabil plain is also one of the areas prone to subsidence due to climate changes and the decrease of underground water in recent years. The aim of the present research is the zoning subsidence risk in this plain. First, the factors influencing subsidence in the Ardabil plain (slope, land use, lithology, distance from the fault, distance from the waterway, drop in water level, distance from the city and the village) were identified. Then the layers of data were applied in the geographic information system. In the next stage, the weighting of the investigated factors was done using ANP method and in the Super Decision software, and the final analysis and modeling were done using the MABAC method as one of the multi-criteria decision making methods. Finally, the resulting map was classified into five categories from very low risk to very high risk. The results showed that such factors as water level drop, distance from the river and lithology have the highest weighting factor. Moreover, 244.29 and 370.59 square kilometers, respectively, of the area of this plain, are in very dangerous and dangerous classes. Finally, due to the high potential of Ardabil plain in terms of subsidence, protective and management measures should be taken into consideration by relevant authorities and institutions.

Keywords: Hazards, Subsidence Phenomenon, MCDM, Ardabil Plain

*. Corresponding author: Mousa Abedini E-mail: abedini@uma.ac.ir Tel: + 989143555226

How to cite this Article: Abedini, M., Aghayary, L., & Asghari Saraskanrood, S,. (2023). Evaluating and zoning subsidence risk using MABAC and ANP adaptive algorithm (Case study: Ardabil Plain), *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(4), 43-68.
DOI:10.22067/geoeh.2022.74202.1143

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74202.1143

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۶۸-۴۳

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعهٔ موردی: دشت اردبیل)

موسی عابدینی[۱]- استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
لیلا آقایاری- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
صیاد اصغری سراسکانرود- استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۴

چکیده

یکی از مخاطرات پیشروی دشت‌های کشور، مخاطره فرونشست است. پدیده فرونشست زمین به دلایل مختلف ازجمله برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوّی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده است؛ ازاین‌رو پرداختن به علل و عوامل تأثیرگذار جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. دشت اردبیل نیز به خاطر تغییرات اقلیمی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر یکی از مناطق مستعد جهت مخاطره فرونشست است. هدف تحقیق حاضر، پهنه‌بندی خطر فرونشست در این دشت است. در این مطالعه ابتدا، عوامل مؤثر جهت ایجاد فرونشست در دشت اردبیل (شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، افت سطح آب، فاصله‌ازشهر و روستا)، شناسایی شدند و سپس نسبت به تهیهٔ لایه‌های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی اقدام گردید. در مرحله بعد وزن‌دهی عوامل موردبررسی، با استفاده از روش ANP و در محیط نرم‌افزار Super Decision انجام گردید و تحلیل و مدل‌سازی نهایی با استفاده از

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۵۵۵۲۲۶ Email: abedini@uma.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

عابدینی، موسی؛ آقایاری، لیلا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطرفرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۴). صص ۶۸-۴۳
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74202.1143

روش MABAC به‌عنوان یکی از روش‌های تصـمیم‌گیری چندمعیاره، انجام شـد. درنهایت، نقشۀ حاصله در پنج ردۀ با خطر بسـیار کم تا خطر بسـیار زیاد طبقه‌بندی گردید. با توجه به نتایج مطالعه، عوامل افت سطح آب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. همچنین، نتایج مطالعه نشان داد؛ به ترتیب ٢٤٤/٢٩ و ٣٧٠/٥٩ کیلومترمربع از مساحت این دشت، در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند. درنهایت می‌توان اظهار داشـــت، نظر به توان بالای دشـــت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشـــست، بایستی اقدامات حفاظتی، مدیریتی در سطح دشت اردبیل مورد توجه مسئولان و دستگاه‌های ذیربط قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مخاطرات، پدیده فرونشست، MCDM، دشت اردبیل.

۱- مقدمه

چشـــم‌انداز سـطح زمین به‌عنوان سـیسـتمی پیچیده حاصل تعامل فاکتورهایی نظیر فرآیندهای جغرافیایی، اقلیمی، زمانی و فعالیت‌های انسانی است. رشد کالبدی، بدون رعایت اصول برنامه‌ریزی شهری و ساخت‌وسازهایی بدون در نظر گرفتن پتانســیل مخاطرات موجود در پهنه‌های در معرض مخاطرات طبیعی، آســیب‌پذیری و خســـارت‌ها در محدوده‌های مورد نظر را تشـدید می‌کند. عواملی که با تغییر در چگونگی سـاختار و کارکرد توپوگرافی طبیعی و ریز اقلیم، به‌ویژه در محیط‌های انسـان‌سـاخت، زمینه‌سـاز ایجاد مخاطراتی نظیر زمین‌لغزش، سـیلاب‌شـهری، زمین‌لرزه و فرونشـــست می‌گردد (فنی و همکاران، ١٣٩٦). براساس تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده، پدیده فرونشست زمین شـامل فروریزش یا نشست روبه پائین سطح زمین است که می‌تواند دارای حرکت قائم رو به پائین سطح زمین و کمی افقی باشـد (عابدینی،١٣٩٦). پدیده فرونشـــســـت زمین به دلایل مختلف ازجمله برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوی سـبب بروز مشـکلات و معضـلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی می‌شـود (عابدینی و همکاران،١٤٠١). فرونشـــســـت ازجمله مخاطرات زمین‌شـناسـی است که از لحاظ سـرعت شـکل‌گیری، به دو دسـته سریع و تدریجی تقسیم می‌گردد. حالت تدریجی به دلیل تلفات انسانی کم آن در مقایســـه با دیگر پدیده‌های طبیعی مانند زلزله، لغزش و ســـیلاب کمتر موردتوجه قرار می‌گیرد (مدنی و همکاران، ١٣٩٦).

اما فرونشـــســـت در حالت سـریع باعث آسیب به سازه‌ها و تلفات انسانی می‌گردد. فرونشست زمین در سال‌های اخیر به مشـکلی جهانی تبدیل شـده اسـت. چراکه در اکثر کشـورها در حال وقوع اسـت. فرونشست سبب تخریب کانال‌های آبیاری، شـکسـت خطوط لوله‌های آب و نفت، خطوط انتقال نیرو و تخریب سازه‌ها و تشدید فرایند زمین لغزه و سـیلاب‌ها می‌شود (محمودی و همکاران، ١٣٩٢). فرایندهای طبیعی مانند حرکات تکتونیکی، فوران آتشفشان، انحلال سـنگ‌ها و کارسـتی شدن، تراکم رسوبات و ذوب زمین‌های یخ بسته معمولاً سبب فرونشست زمین در ناحیه

وسـیع می‌گردند (ژوییی[1] و همکاران، ٢٠١٦). به‌طورکلی فرونشست متأثر از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه آب از سـفره‌های آب زیرزمینی و پارامترهای زمین‌شـناسی است که در صورت عدم شناخت این پدیده سبب آسیب جدی به زیرسـاخت‌های اقتصـادی می‌گردد (گالووی[2] و همکاران، ٢٠٠٩). پژوهشـگران رابطه بین توسعه شهری و فرونشـــست زمین را رابطه‌ای دو جانبه می‌دانند که هردو بر هم تأثیر گذاشـته و تأثیر می‌پذیرند. به گفته آن‌ها تمدن شـهرها به جهت رشـد سـریع در توسـعه شـهری در بخش‌های مختلف صـنعت، تجارت و حمل‌ونقل اثرات زیسـت‌محیطی منفی از خود بر جا می‌گذارند؛ مانند: تغییر در کاربری اراضی کشاورزی به مسکونی، مصرف بی‌رویه منابع آب‌های زیرزمینی جهت گسترش فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت این اثرات منفی درنهایت منجر به بروز پدیده فرونشـست می‌شود و همین پدیده می‌تواند برنامه و فرایند توسعه شهری را متأثر سازد (منتظریون و همکاران، ١٣٩٨).

به‌منظور شـناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش فرونشست بیش‌ازپیش در کشور و دشت اردبیل احساس می‌شود. اولین گام در پایش فرونشست اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ناشی از آن در سطح زمین است. با علم به میزان نرخ فرونشست و همچنین پهنه و گستره مناطق تحت تأثیر، نه‌تنها قادر خواهیم بود، میزان پیشـرفت این پدیده را در یک منطقه شـناسـایی کنیم و از پیشـرفت بیشـتر آن جلوگیری نماییم. بلکه می‌توانیم اطلاعات باارزشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی و سفره آب زیرزمینی به دست آوریم.

امروزه؛ از یک سـو، سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسـک هسـتند (بوخیر[3] و همکاران، ٢٠٠٦) و در سـال‌های اخیر، جهت مطالعه فرونشـست مورد اسـتفاده فراوان قرار می‌گیرند. از سـوی دیگر، برای کشـف طیف وسـیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM اسـتفاده می‌شـود (آهر[4] و همکاران، ٢٠١٣). در این روش‌های تصـمیم‌گیری برای بهینه‌سـازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صـحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران[5]، ٢٠١٥؛ عرب عامری و همکاران، ٢٠١٨). لذا می‌توان گفت، اسـتفاده از سـیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد. مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان انجام شده و توانایی تحلیل‌های تصـمیم‌گیری چندمعیاره، برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشـسـت نشـان داده اسـت. تاکنون مطالعات فراوانی پیرامون پهنه‌بندی مخاطرات ازجمله فرونشست در ایران و سایر کشورها انجام شده است که به برخی از آن‌ها

1 zhu et all
2 Galloway at all
3 Bukheir et all
4 Aher et all
5 Georgiou et all

اشـاره می‌شود. استیفن[1] (۲۰۱٦)، به بررسی علل فرونشست و عوامل تشدیدکننده و خسارات ناشی از فرونشست را بررسی کرده و مهم‌ترین علت فرونشست را تخلیه بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی و انحلال سنگ‌های کربناته اعلام کرد. کویی انجوین[2] (۲۰۱٦)، در کتاب علل فرونشست زمین در شهر هوشی‌مین به مطالعه این پدیده پرداخته و توصیه‌های مناسـبی در جهت مدیریت آن در سـطح شـهر بیان کرده اسـت. گامبولاتی[3] و همکاران (۲۰۰٦)، به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسـانی بر میزان فرونشـسـت زمین در مناطق مسـکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سـازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشـسـت در مناطق مسـکونی بیان کردند. هوانگ و همکاران[4] (۲۰۱٦)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشـسـت بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ٤٥ میلی‌متری است و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اقدام به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS کرده و نتیجه کارشان نشان داده که بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشـسـت در مناطق با برداشـت زیاد، آبرفت‌های ضـخیم، و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد فرونشـست دشت روانسرا- سنجابی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی کار کرده‌اند و نتایج نشـان داده که ارتباط و همبسـتگی قوی میان عمق رسوبات ریز دانه چاه‌ها و احتمال فرونشست زیاد آتی وجود ندارد به‌طوری‌که حداکثر عمق رسـوبات ریز دانه در نواحی مستعد فرونشینی با احتمال خطر باال، حدود ۱۲ ۹ متر است این در حالی است که در برخی از نقاط آبخوان که استعداد کمتری برای فرونشست دارند عمق رسوبات ریز دانه بسیار بیشتر و حدود ۲۰ ۲۲ متر است.

شـادفر و همکاران (۱۳۹٤)، در مقاله‌ای به پهنه‌بندی خطر فرونشـست زمین با استفاده از روش AHP پرداختند. نتایج حاصـل نشـان می‌دهد که فاکتور برداشـت بی‌رویه با ضـریب ٤٨ درصد در درجه اول و عامل سنگ‌شناسی با ضـریب ٢٤ درصـد در درجه دوم اهمیت در ایجاد فرونشست منطقه است. همچنین نتایج نشان داد که ٥٥ درصد از مسـاحت منطقه، در پهنه‌بندی با خطر نسبتاً زیاد و خیلی‌زیاد قرار دارند. شایان (۱۳۹۵)، به پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضـه آبخیز قره‌چای همدان پرداختند. جهت پهنه‌بندی از ٥ لایه ارتفاع، زمین‌شـناسی، هیدرولوژیکی شبکه‌های زهکشـی و شـیب اسـتفاده کردند. نتایج نشـان می‌دهد که تغییرات ناهمسـان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشـدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع فرونشـسـت در منطقه بوده و عوامل لیتولوژیکی و انسـانی به‌تنهایی نقشـی ندارند. فنی و همکاران (۱۳۹٦)، به پهنه‌بندی و تحلیل فضایی حساسیت مخاطرات چهارگانه

1 Stephen
2 coein enjoein
3 Gambolati
4 hoang at all

محیطی زمین‌لغزش، سـیل، زلزله و فرونشـسـت در مناطق ۲۲ گانه شـهر تهران پرداختند. روش مطالعه در این مقاله، روش تحلیل سـلسله‌مراتبی AHP است و از نقشه‌های بارندگی، شکل شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، کاربری اراضـی و زمین‌شـناسـی اسـتفاده کرده‌اند و نقشـه حسـاسـیت نهایی در قالب ٥ کلاس حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسـط، کم و خیلی‌کم طبقه‌بندی و به‌صـورت نقشه و جدول استخراج و ارائه شده‌اند. عالی پور و همکاران (١٣٩٦)، به پهنه‌بندی ریسـک فرونشـسـت زمین در اثر افت سـطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سـلسـله مراتبی فازی دشـت اردبیل پرداختند و اقدام به تهیه نقشـه احتمال فرونشـسـت زمین و تعیین مناطق دارای ریسـک پرداختند. لایه‌های اطلاعاتی شـامل ٥ لایه زمین‌شـناسـی، فاصـله از گسـل، افت سطح‌آب زیرزمینی، شیب و ضخامت آبرفت به‌عنوان معیارهای مؤثر مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج نشان داد که ۱۳ درصد منطقه دارای ریسک خیلی‌بالا اسـت و حدود ٦٧/٥ درصـد مناطق جنوبی در بخش ریسـک‌های خیلی بالای فرونشـسـت، به دلیل استفاده بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی اسـت. بهیاری و همکاران (١٣٩٦)، به ارزیابی تأثیر سـاختارهای فعال بر خطر فرونشـسـت زمین با اسـتفاده از مدل‌های تصـمیم‌گیری چندمتغیره پرداختند. در این مطالعه از روش AHP به‌منظور تجزیه‌وتحلیل خطر فرونشـسـت در منطقه موردمطالعه با اسـتفاده از لایه‌های مطالعاتی ارتفاع، شـیب، آبراهه‌ها و زمین‌شـناسـی، نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست در منطقه تهیه گردید. این نقشه نشان می‌دهد که خطر فرونشست در بخش جنوبی منطقه نسـبت به سـایر مناطق بیشـتر اسـت. کوه بنانی و همکاران (١٣٩٨)، به پهنه‌بندی گسـتره خطر فرونشـسـت زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سـنجی راداری در دشـت کاشمر و خلیل‌آباد با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ مربوط به سـال‌های ٩٤ تا ٩٧ پرداختند. نتایج نشـان داد، این منطقه در بیش‌ترین حالت ۱۷ سـانتی‌متر در سـال فرونشست دارد و بیشتر در حومه جنوب‌غرب شهر کاشمر و مناطق غربی دشت خلیل‌آباد متمرکز است. منتظریون و همکاران (١٣٩٨)، مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی خطر فرونشـسـت زمین با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه اسـتان‌های تهران و البرز با به‌کارگیری روش AHP تحلیل نمودند و نتایج نشـان می‌دهد که مناطق وسـیعی در استان تهران ازجمله غرب و جنوب‌غربی و همچنین دشت ورامین، شهریار و کرج از مناطق مستعد وقوع فرونشست اسـت. شـفیعی و همکاران (١٣٩٩)، به بررسـی فرونشـسـت دشت آبخوان نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند و جهت بررسـی وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی از روش درون‌یابی IDW استفاده کرده‌اند و نقشـه‌های حاصل از فرونشست نشان می‌دهد که نرخ نشست در هرسال به‌طور میانگین ٤ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ٤ سـاله ١٦ سانتی‌متر است. ابراهیمی و همکاران (١٣٩٩)، به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سـنجی پرداختند. نتایج حاصـل از روش تداخل‌سـنجی راداری محدوده مطالعاتی در طی بازه زمانی یک‌سـاله بین ١٥ تا ٨٥ میلی‌متر فرونشـسـت را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را هم افت سـطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. شاه کرمی و همکاران (١٣٩٩)، مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب

زیرزمینی در دشـت اراک را موردبررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع هستند که نواحی مرزی و حاشـیه‌ای دشـت اراک در معرض افت بیش‌تر آب قرار دارند و تمرکز رسـوبات ریزدانه رسی در قسمت‌های غربی به‌مراتب بیشـتر از نواحی دیگر است. درنتیجه احتمال می‌رود این نواحی در معرض خطر فرونشست بیشتری باشند. زارعی و همکاران (۱۳۹۹)، به تعیین رابطه فرونشـست زمین و افت سـطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل‌سنجی راداری و ایستگاه سایت gps دشت سلماس پرداختند و نتایج نشان داد که به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی، ۰/۰۷۸ متر سطح زمین در دشت نشست می‌کند. جوادی (۱٤۰۰)، در رساله خود به برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشـت همدان- بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS در طی بازه زمانی ۵ ساله و میزان فرونشست این دشـت را ٥٦ میلی‌متر به‌صـورت سـالانه برآورد کرده است و بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق دارای افت منابع آب زیرزمینی اسـت. فرزین‌کیا و همکاران (١٤٠٠)، به پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوین با اسـتفاده از مدل تحلیل شـبکه‌ای فازی پرداختند در این تحقیق از روش ANP و فازی، فرونشـسـت به‌صـورت کلاس‌بندی برای نشان دادن ویژگی‌های مناطق بحرانی فرونشست و اولویت‌بندی مناطق مختلف از نظر استعداد برای وقوع پدیده فرونشست به دست آمد و نتایج بیانگر این است که ٥٦ درصد قسمت مرکزی دشت جوین با خطر زیاد تا خیلی زیاد به‌حساب می‌آیند.

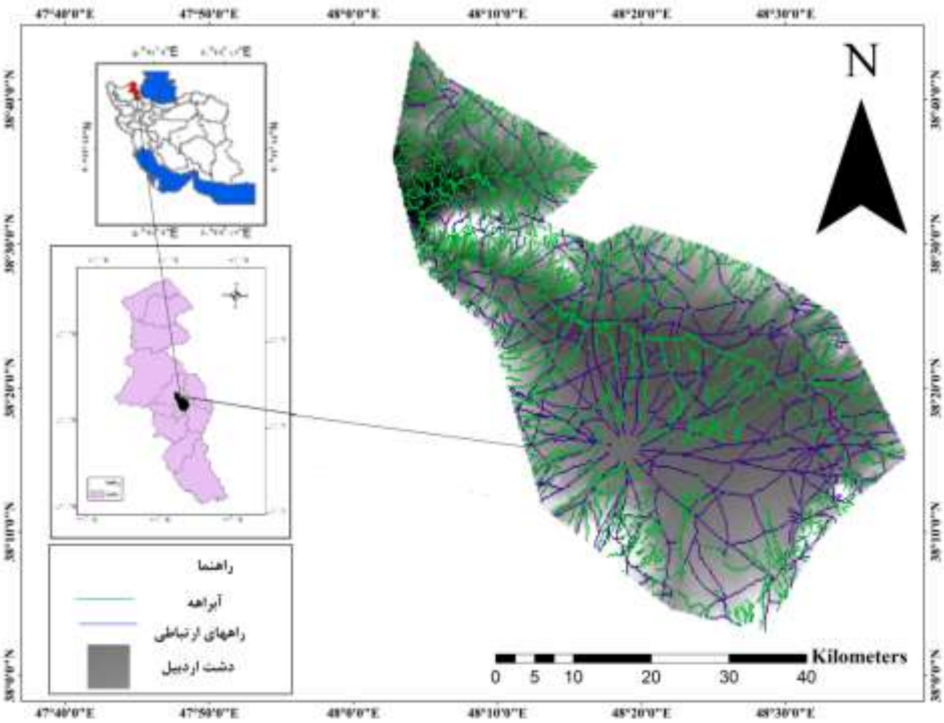
هرچند که تحقیقات معدودی در مورد دشـت اردبیلی انجام شـده، ولی موضـوع آن‌ها متفاوت بوده اسـت. عابدینی(۱۳۹۲)، در مورد علل فرونشـست دشت اردبیل کار کرده، و مهم‌ترین علل آن را برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های تکتونیک حاصـل از گسل‌های حواشی دشت و سنگینی ناشی از انباشت آبرفت‌ها عنوان کرده است

با توجه به منابع بررسـی شـده محققان مختلف این تکنیک را به‌عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شـناسـی همچون فرونشـسـت مطرح کرده اسـت. روش MABAC، که براسـاس رویکرد برنامه‌ریزی مطلوب و بهینه‌سـازی چندمعیاره پایه‌ریزی شـده اسـت، به‌عنوان روش تصـمیم‌گیری چند معیاره، در تلفیق با فرایند تحلیل شـبکه، به‌منظور پهنه‌بندی پتانسـیل وقوع فرونشـست دشت اردبیل استفاده شد. طبق بررسی منابع منتشر شده، تاکنون در دشـت اردبیل با این روش و داده‌های ورودی، پژوهشـی ارائه نشـده است لذا جهت برآورد دقیق‌تر میزان فرونشـسـت و عوامل تأثیرگذار بر آن لزوم و خلأ انجام تحقیق با این روش کاملاً احساس می‌شود. لذا اهداف تحقیق حاضر، بررسی فرونشست دشت اردبیل با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، پهنه‌بندی فرونشست، اندازه‌گیری معیارهای مؤثر بر فرونشست و بررسی مؤثرترین عوامل در فرونشست دشت اردبیل است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

دشــت اردبیل در شــمال‌غرب ایران در قسمت شرقی فلات آذربایجان و از نظر تقسیمات کشوری در مرکز استان اردبیل واقع شـده اسـت. در بررسـی زمین‌شـناسی، دشت اردبیل با مختصات جغرافیایی ٤٨ درجه تا ٤٨ درجه و ٣٠ دقیقه طول خاوری و ٣٨ درجه و ٣٠ دقیقه شمالی قرار دارد. زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. ارتفاع متوسـط اراضـی کشـاورزی حدود ١٣٦٠ متر از سـطح دریاهای آزاد قرار دارد. وسـعت آن حدود ٨٢٠ کیلومترمربع اسـت و جزئی از حوضـه آبخیز رودخانه قره‌سـو به شـمار می‌رود. دشـت اردبیل متشـکل از ٨٨ واحد روسـتایی ده واحد دهسـتان و ٢ واحد شهری اردبیل و آبی بیگلو است. شهر اردبیل مرکز استان اردبیل در غرب این دشـت واقع شـده اسـت. در محدوده دشـت اردبیل تعداد ٢٢٤٣ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق، ٢٠ دهنه چشمه و ١٨ رشته قنات وجود دارد که به مصارف کشاورزی اختصاص دارند (رستم‌زاده و همکاران، ١٣٩٤).



شکل ١- نقشه موقعیت دشت اردبیل

۲-۲- داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

در راستای انجام این پژوهش از داده و تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای متعددی استفاده شده است که مشتمل بر موارد زیر خواهد بود:

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چندمعیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای ENVI،Ecognition، Arc GIS و Excel بهره‌گیری شده است. جهت بررسی خطر فرونشست، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، افت سطح‌آب و فاصله از شهر و روستا)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایۀ اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشۀ رودخانه‌های استان اردبیل، تهیه گردید. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، دانلود شده از سایت (USGS)، تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی اردبیل؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدودۀ موردمطالعه، از تصاویر سنجنده لندست هشت (سنجنده *OLI*)، به شماره گذر ۱٦۷ و ردیف ۳٤، تاریخ ۲۰۲۰ /۰٦/۲۰، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است (جدول ۱).

تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال: تصویر ماهواره‌ای اپتیکال در این تحقیق به‌منظور استخراج نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ استفاده شد. مشخصات تصاویر لندست اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی از نرم‌افزار ENVI5.3 و به‌منظور استخراج نقشه‌های مربوطه از نرم‌افزار ARCGIS10.5 استفاده شد. برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی شیءگرا در نرم‌افزار ecognition developer64، استفاده شد. همچنین به‌منظور به دست آوردن صحت طبقه‌بندی از Google Earth، استفاده شد.

جدول ۱- اطلاعات تصاویر سنجنده لندست ۸

Year	Sansor name	PATH	ROW	SUN-AZIMUTH	SCENE-CENTER-TIME
۲۰۲۰	Landsat 8	۱٦۷	۳٤	۱٤٥,٥۰۲٤۸۳۹۷	۰۷:۲٦:۲۷

در روش طبقه‌بندی شیءگرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردیده و پیکسل‌ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر براساس این قطعه‌ها انجام

می‌شود. در قطعه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم‌های مختلف، با نسبت‌های مختلف طیفی و شکلی طبقه‌بندی و براساس ویژگی‌های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته‌بندی شده‌اند. طی این فرآیند شی‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن براساس پارامترهای مقیاس، رنگ، شکل، ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی‌زاده و هیلالی،۱۳۸۹). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان‌دهنده اشیا با ابعاد مختلف می‌باشند تعیین شد. در این پژوهش تصویر قطعه‌بندی شده، دارای مقیاس ٤٥، شکل ۰/۵، ضریب فشردگی ۰/۵، انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد و کلاس‌های موردنظر، در طبقه‌بندی تعیین شی‌های نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم‌افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه‌بندی با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه و روش درخت تصمیم‌گیری صورت گرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۰ با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹٦ است.

فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

روش (ANP) شکل توسعه یافته‌ای از روش (AHP)، است که قادر است همبستگی و بازخوردهای موجود بین عناصر در یک تصمیم‌گیری را مدل‌سازی نموده و تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم‌گیری را منظور و وارد محاسبات نماید. در مدل AHP، تنها معیارها با معیار بالایی خود ارتباط داشتند؛ یعنی معیارها به هدف‌ها، زیرمعیارها به معیارها و گزینه‌ها هم به زیرمعیارها وابسته بودند، حتی خود معیارها هم به همدیگر وابسته نبودند. ولی در مدل ANP، نه‌تنها خوشه‌ها بر عناصر و عناصر بر گزینه، گزینه بر عناصر تأثیر می‌گذارند، بلکه حتی عناصر بر خودشان و بر دیگر خوشه‌ها نیز اثرگذارند. به‌طورکلی، روش (ANP)، دارای مراحلی نیز هست که شامل، ۱- تعیین معیارها و شاخص‌ها ۲- تعیین روابط و ارتباطات بین عناصر و خوشه‌ها: در این گام، مسألهٔ تصمیم‌گیری به ساختار شبکه‌ای تجزیه می‌گردد.۳- مقایسات زوجی بین عناصر و خوشه‌ها: ماتریس‌های مقایسات زوجی مشابه با روش (AHP) است و زوج‌های عناصر تصمیم‌گیری در هر خوشه به نسبت اهمیتشان در جهت شرط‌های کنترلی آن‌ها مقایسه می‌شوند. ٤- تشکیل سوپرماتریس‌ها: الف- تشکیل سوپرماتریس اولیه یا غیر وزنی ب- تشکیل سوپرماتریس وزنی ج- تشکیل سوپرماتریس حدی: سوپرماتریس وزنی، به توان حدّی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. ۵- نتایج ماتریس خوشه‌ها. ٦- نتیجهٔ نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و درنهایت، نتیجهٔ نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص می‌گردد (فرجی سبک‌بار و همکاران، ۱۳۸۹).

گام‌های روش ماباک (MABAC)

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش. ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش به‌صورت معیار-گزینه است؛ یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر

سـلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسـبت به هر معیار اسـت. ۳- در این مرحله نسـبت به اسـتانداردسـازی و یا به‌عبارت‌دیگر بی‌مقیاس نمودن معیارها، اقدام می‌گردد. در این پژوهش، از روش فازی و تابع عضـویت خطی (Linear) و سـیگموئیدال (Sigmoidal)، به‌منظور اسـتانداردسـازی استفاده شده است. در مجموعه‌های فازی، مقدار یک به‌عنوان بیشـترین ارزش به حداکثر عضـویت و صفر به‌عنوان کمترین ارزش، به حدّاقل عضویّت لحاظ می‌گردد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹).

٤- وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: در این گام با اسـتفاده از رابطه زیر، ماتریس نرمال را وزن‌دار می‌کنیم (رابطه ۱). در مطالعه حاضـر جهت وزن‌دهی معیارها از روش ANP اسـتفاده شـده اسـت و نتایج حاصل از وزن‌دهی ANP، با توجه به رابطه زیر، به تک تک لایه‌های اطلاعاتی لحاظ گردیده است.

رابطه ۱ $(V_{ij}=W_j*(n_{ij} + 1)$

که در آن nij عناصر ماتریس نرمال شده (N) را نشان می‌دهد،wi ضرایب وزنی معیار را نشان می‌دهد.

٥- تعیین مرز ناحیه شـباهت ماتریس (g): در رابطه ٤،vij عناصـر ماتریس وزنی (V) و m تعداد کل گزینه‌های جایگزین را نشـان می‌دهد. پس از محاسـبه مقدار gi ماتریس محدوده‌های تقریبی مرزی با توجه به معیارهای G با فرمت N*1 شـکل می‌گیرد و n تعداد کل معیارهایی را که گزینه‌های ارائه شـده برای آن‌ها انتخاب می‌شـود را نشان می‌دهد.

رابطه ۲ $(g_i=(\prod_{j=1}^{m} v_{ij})^{1/m})$

بنابراین اگر n معیار داشته باشید یک ماتریس G1×n به‌صورت زیر خواهیم داشت (رابطه ۳):

رابطه ۳ $[G=[g1.g2.\dots.gn$

٦-محاسبه فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت: در این بخش با استفاده از رابطه ٤، فاصله گزینه‌ها را تا ناحیه g به دست می‌آید. در واقع باید ماتریس وزن‌دار را از ماتریس g کم کرد.

رابطه ٤ $Q=V-G$

پس از مشـخص شـدن ماتریس Q، می‌توان با اسـتفاده از حد بالایی مسـاحت (G+) و حد پایین مساحت (G−) وضعیت هر گزینه را مشخص کرد.

٧- انتخاب گزینه بهینه: در روش ماباک MABAC، با اسـتفاده از رابطه ۵، امتیاز نهایی هر گزینه را مشخص کرده و بر اساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

رابطه ۵ $S_i=\Sigma(q_{ij});i=1.2\dots.n;j=1.2\dots.m$

محاســبه مقادیر توابع معیار، توسـط گزینه‌ها به‌عنوان مجموع فاصـله‌های جایگزین از مناطق تقریبی مرزی qi به دسـت می‌آید. با جمع‌کردن عناصـر ماتریس Q در هر سطر، مقادیر نهایی تابع معیار گزینه‌ها به دست می‌آید. در این رابطه n تعداد معیارها را نشان می‌دهد و m تعداد گزینه است (علیزاده و همکاران ۲۰۲۱).

جدول ۲- نوع توابع فازی‌سازی لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست دشت اردبیل

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع‌بزرگ فازی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع‌بزرگ فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از آبراهه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
افت سطح آب	با کاهش میزان سطح آب چاه‌ها، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی

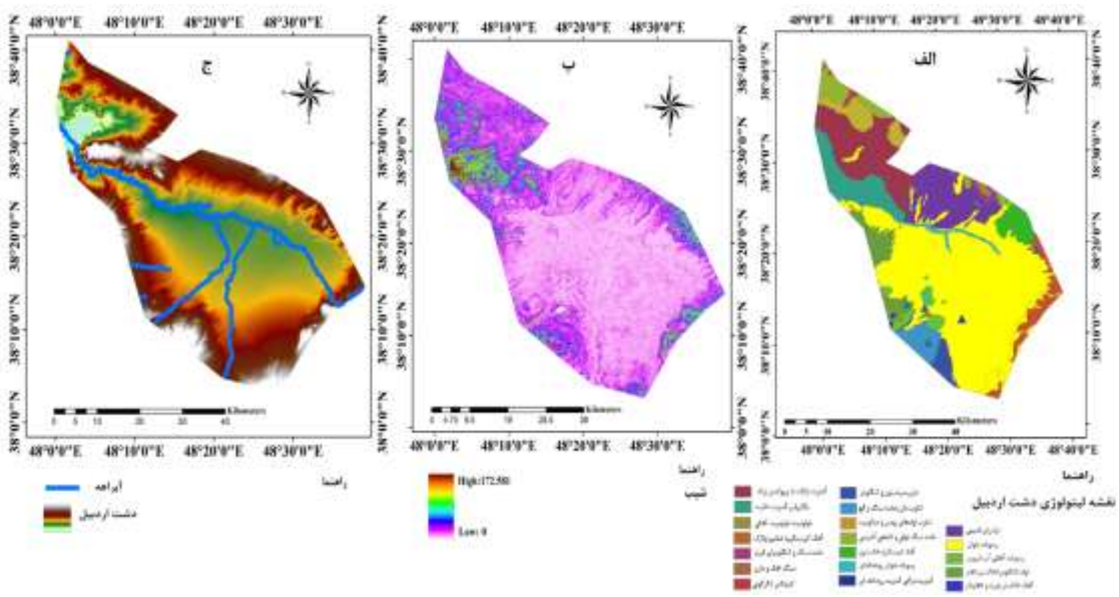
معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل

لیتولوژی: قدیمی‌ترین سـازندهای شـناخته شده در دشت اردبیل دولومیت و دولومیت آهکی متعلق به ژوراسیک اسـت. رخسـاره‌های کرتاسه، ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز می‌باشد. رخساره‌های دوران سوم شامل ماسه‌سنگ‌های توفی و توفی برشـی با میان لایه‌های گدازه آندزیتی، آهک کریسـتالیزه، آندزیت بازالت با پیروکسـن زیاد مربوط به پالئوژن می‌باشد. آبرفت‌های کواترنر که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیش‌ترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها را دارد، از رسـوبات آبرفتی تشـکیل شـده اسـت که در مرکز و قسـمت‌شـرقی دشـت بیشـترین میزان فرونشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به‌واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کمتر از سایر بخش‌ها است (شکل ۲، الف).

شیب: دشت اردبیل در شمال‌غرب ایران و در قسمت‌شرقی فلات آذربایجان به‌صورت حوضه بسته‌ای است که از شـمال و غرب منطقه به کوه سـبلان و کوه‌های اطراف آن و از شرق و جنوب به رشته‌کوه‌های تالش منتهی می‌گردد؛ بنابراین زمین‌های حاشـیه دشـت از اطراف به سـمت دشت شیب دارند. بررسی وضعیت ارتفاع نشان می‌دهد که در بخش مرکزی دشـت کم‌ترین میزان ارتفاع وجود دارد. شـواهد فرونشـسـت نیز بیش‌تر در این طبقه ارتفاعی دیده می‌شـود. در مورد لایه شـیب، محدوده شیب ۵-۰ کمترین میزان شیب در محدوده منطقه می‌باشد که این شیب نقش

مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شـــیب افزایش می‌یابد، از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد (شکل ۲، ب).

فاصـله از رودخانه: عامل نزدیک به رودخانه به‌عنوان عامل مزاحم در ایجاد فرونشست شناسایی گردید (شایان و همکاران، ۱۳۹۵) و با فاصـله گرفتن از رود امتیاز بیشتری به زمین‌های منطقه تعلق می‌گیرد. هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز اســتفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و اســتفاده از آب‌های ســطحی بالا می‌رود و در پی اسـتفاده نادرسـت از آب‌های زیرزمینی و افت سـطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشـسـت افزایش می‌یابد (شکل ۲، ج).



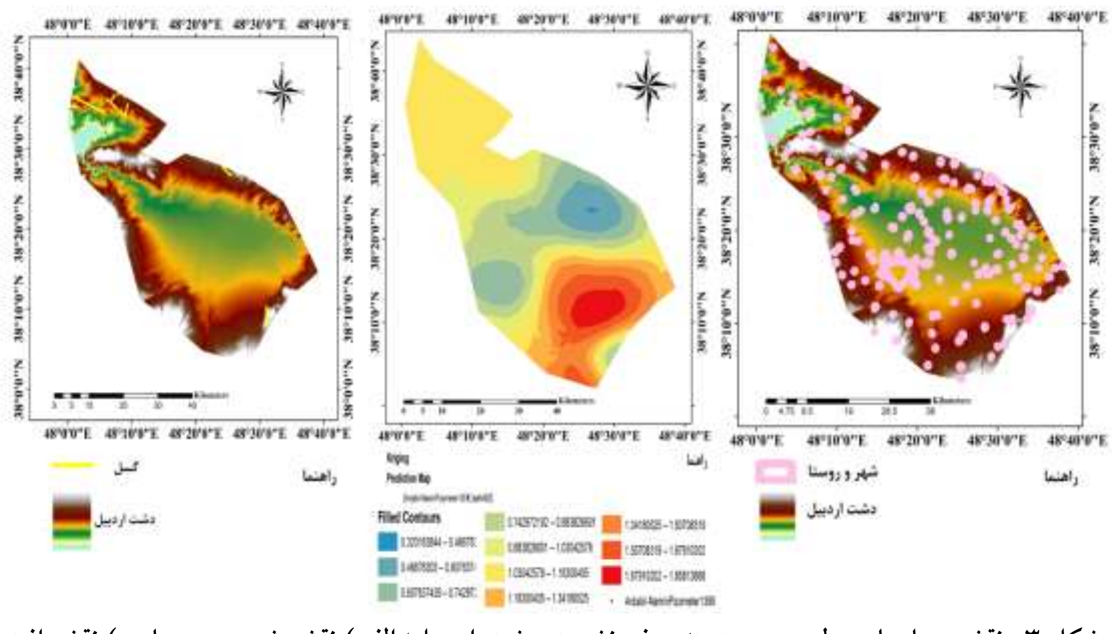
شکل ۲- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ الف) نقشه لیتولوژی، ب) نقشه شیب، ج) نقشه آبراهه

فاصله از شهر و روستا: عوامل انسان‌ساخت مانند زمین‌های کشاورزی، ابنیه بزرگ و صنعتی، تأسیسات زیرزمینی مانند تونل، خطوط انتقال نیرو و عملیات حفاری و معدن کاری، ســکونت‌گاه‌های شــهری و روســتایی و شــبکه‌های حمـل‌ونقـل جـاده‌ای بـا افزایش مصـــرف آب‌هـای ســـطحی، زیرزمینی، تحمیـل بار وارده بر زمین در اثر احداث سـاختمان‌های بزرگ و تراکم زیرسـاخت‌ها میزان آسـیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند (شکل ۳، الف).

بررســی تراکم چاه‌ها و افت ســطح آب: براســاس نتایج ارائه شــده از مطالعات محققان، به نظر می‌رسد که اعمال فشـار بیش‌ازحد بر آبخوان ممکن اســت موجب بروز پدیدهٔ فرونشــست شود. ازاین‌رو به بررسی وضعیت سفرهٔ آب

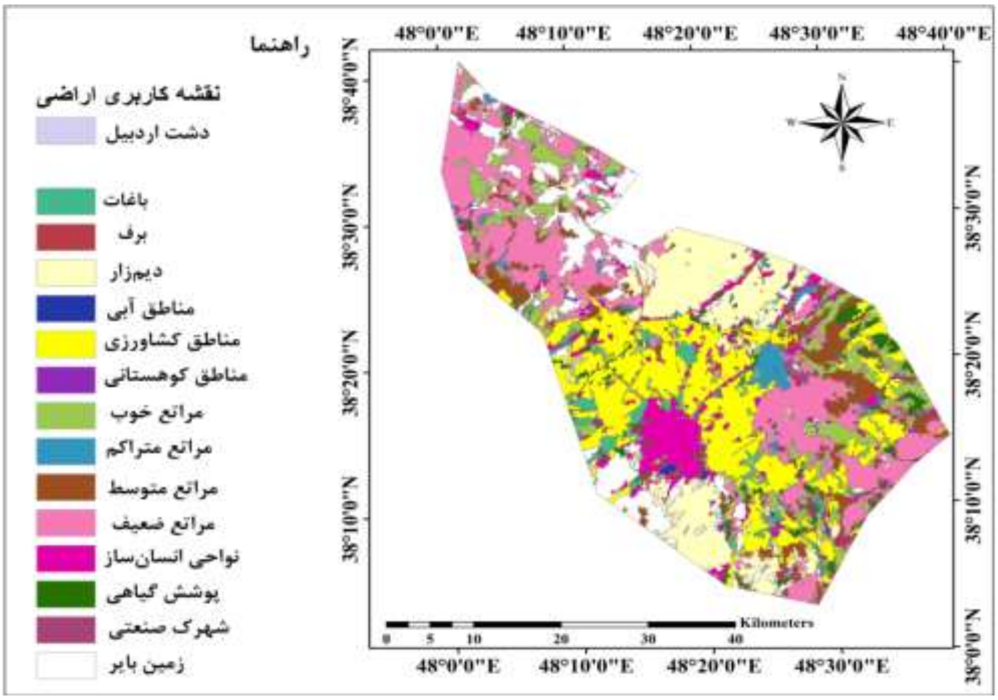
زیرزمینی در محدودۀ موردمطالعه پرداخته شـد. به‌منظور بررسـی و ارزیابی نوسـانات سـطح آب زیرزمینی، از آمار چاه‌های پیزومتری موجود در دشـت، میزان افت سطح آب زیرزمینی طی سال‌های ١٣٦٦ تا ١٣٩٩ محاسبه شد. طبق بررسـی‌های انجام شـده مشـخص است که سطح آب دشت، رو به پایین رفتن است. به‌طوری‌که کمترین افت سطح آب ۱/۳ متر و بیشـترین ۲۳ متر می‌باشد. علت این افت، برداشت‌های غیراصولی به دلیل افزایش حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق به‌صـورت مجاز و غیرمجاز، کاهش بارندگی در سـال‌های اخیر و به‌تبع آن کاهش آب‌های سـطحی در محدوده موردمطالعه می‌باشـد. برایناسـاس بیش‌ترین افت در بخش‌های مرکزی و شـرقی دشت مشاهده می‌شود که احتمال وقوع فرونشست در این قسمت از دشت افزایش می‌یابد (شکل ۳، ب).

فاصـله از گسـل: به دلیل اثر گذاشـتن فعالیت گسـل‌ها (نظیر زلزله)، بر روی فرونشست زمین، بررسی گسل‌های منطقه ضـرورت می‌یابد. گسـل‌ها به نوبه خود نقش مؤثر و مهمی در میزان توسـعه فرونشست در سطح دشت دارد. به‌گونه‌ای که هر چه میزان فاصـله از خطوط گسـل بیش‌تر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشـست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصله به خطوط گسل نزدیک‌تر شود احتمال وقوع فرونشست بیش‌تر می‌شود. در دشت اردبیل نیز به علت وجود گسل‌های فراوانی نظیر اردبیل، بزغوش، آستارا و.؛ که دارای روند شمال خاوری – جنوب باختری می‌باشد و به همین دلیل ضریب آسیب‌پذیری بالایی دارد (شکل ۳، ج).



شکل ۳- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ الف) نقشه شهر و روستا ب) نقشه افت آب ج) نقشه گسل

کاربری اراضـی: انواع کاربری در دشـت اردبیل به‌صـورت نواحی انسان‌ساخت، مرتع خوب، مرتع متراکم، مرتع متوسـط، مرتع ضـعیف، پوشـش برف دائمی، دیم‌زار، مناطق کشاورزی، زمین بایر، باغات و پوشش جنگلی، شهرک صـنعتی، مناطق آبی و اراضی بایر می‌باشد. ازآن‌جهت دشت اردبیل دارای توپوگرافی هموار می‌باشد و از آبرفت‌های جوان و تراس‌های قدیم و جدید در اثر ته‌نشست آبرفت‌های رودخانه‌ای با شیب کم تشکیل شده است محل مناسبی برای فعالیت‌های زراعی و باغات ایجاد کرده اسـت. لذا اغلب اراضـی کشـاورزی و نیز باغات در این واحد گسترده شـده است. بررسی معیار کاربری اراضی حاکی از این موضوع است که کاربری اراضی و مراتع و نواحی انسان‌ساز و شـهرک صنعتی بیش‌ترین درصد از مساحت مناطق پرخطر را به خود اختصاص داده است؛ که با مصرف بالای منابع آب زیرزمینی جهت مصارف روزانه و آبیاری احتمال وقوع فرونشست را افزایش می‌یابد.

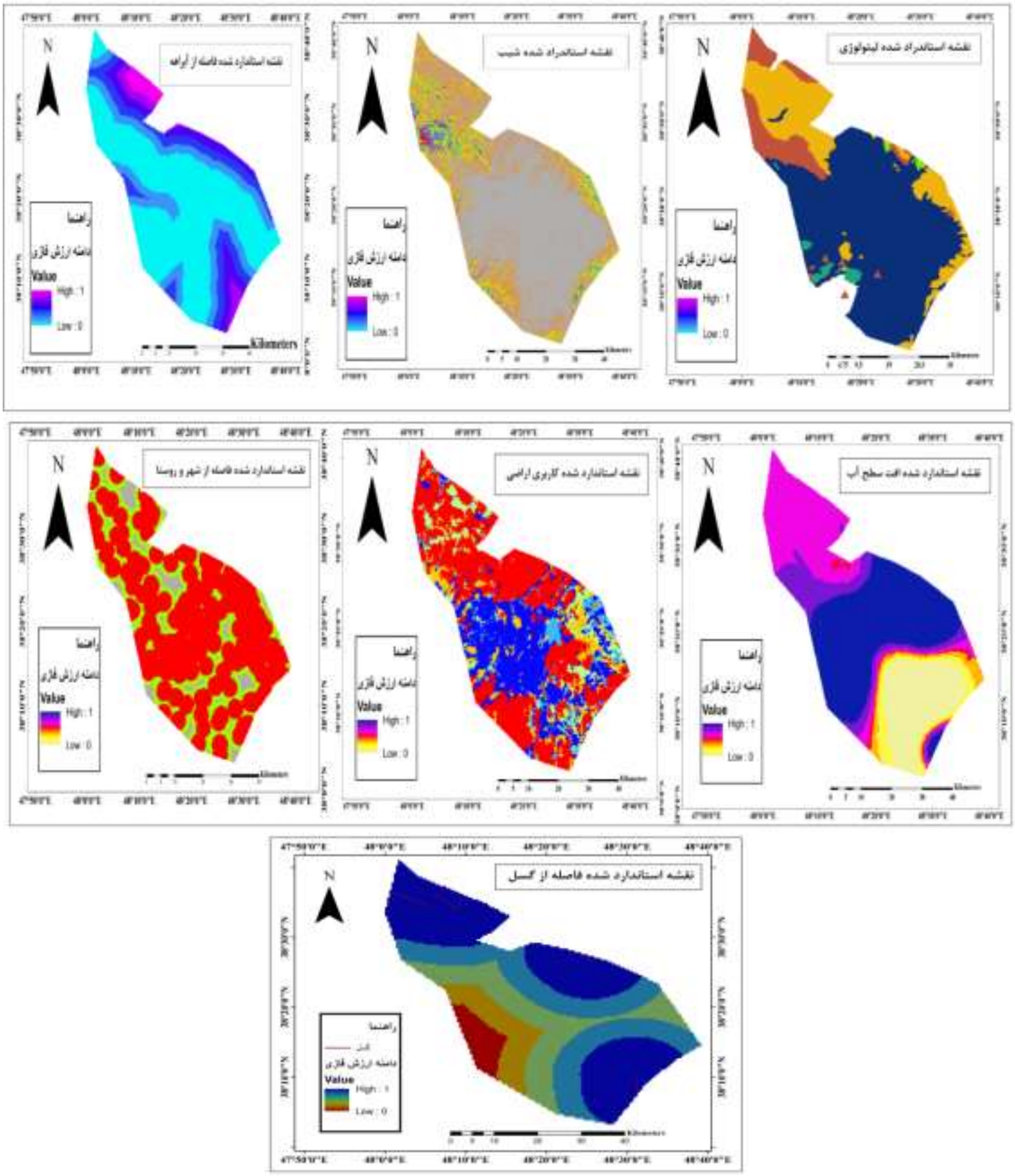


شکل ٤- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ نقشه کاربری اراضی

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش در اندازه‌گیری معیارها برای بررسی و پهنه‌بندی فرونشست، دامنۀ متنوعی از مقیاس‌ها وجود دارد؛ ازاین‌رو، لازم اسـت معیارها قبل از ترکیب با یکدیگر استاندارد شود. در این مطالعه، مرحله مربوط به ارزش‌گذاری و اسـتانداردسـازی به‌صـورت توأم و بر مبنای ارزش عضویت در مجموعه فازی در نظر گرفته شده است. در پژوهش

حاضـر، ارزش عضـویت بین مقادیر ۰ تا ۱ قرار دارد. نقشـه‌های استاندارد شدۀ مربوط به معیارهای مطرح در مطالعه حاضر در شکل ۵، نشان داده شده است.



شکل ۵- نقشه‌های استاندارد شدۀ فازی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل

برای پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل ابتدا وزن‌دهی معیارها انجام شد. پس از محاسبۀ سوپرماتریس غیروزنی یا اولیه مربوط به مدل، سوپرماتریس غیروزنی و سوپرماتریس حدّی، آخرین مرحله برای تعیین ارزش و ضریب نهایی عناصر، محاسبۀ نتایج ماتریس خوشه‌ها و نرمال‌سازی ضریب عناصر در سوپرماتریس حدی توسط ضریب خوشه‌ها می‌باشد، نتیجۀ مقایسات زوجی بین گروه‌ها که جدول اوزان گروه‌ها نامیده می‌شود، در جدول (۳)، آورده شده است.

جدول ۳- ماتریس اوزان گروه‌ها

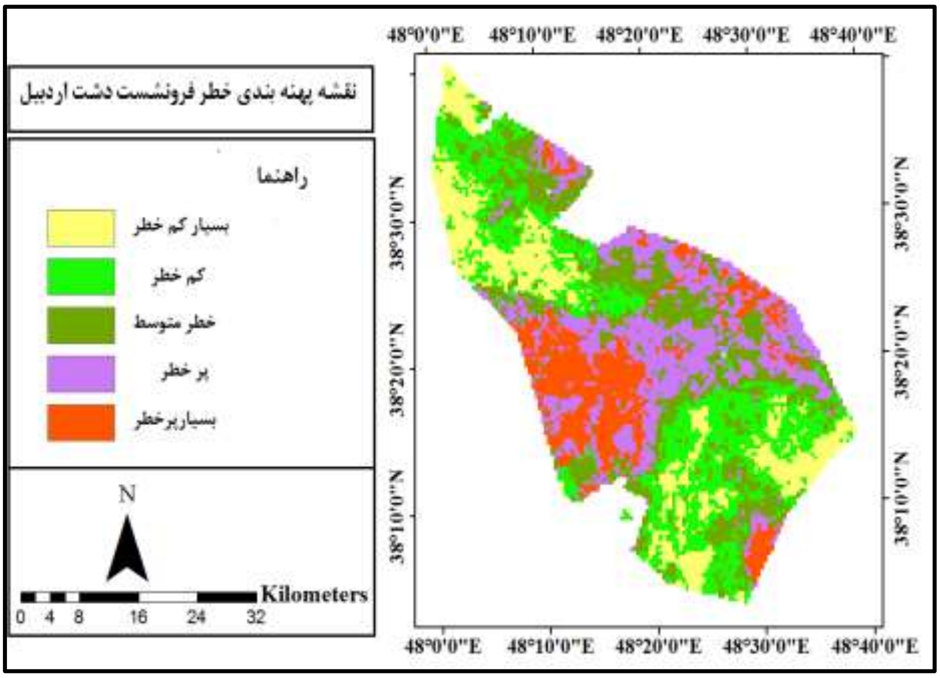
خوشه‌ها	انسانی	زمین‌ساختی	فیزیوگرافی	هیدرولوژی
انسانی	۰/۲۵۲	۰/۲۲۰	۰/۳۳۳	۰/۳۱۲
زمین‌ساختی	۰/۰۹۹	۰/۳۸۸	۰/۳۳۳	۰/۲۹۱
فیزیوگرافی	۰/۸۸٤	۰/۸۸۰	۰/۰۰۰	۰/۰۸٤
هیدرولوژی	۰/۵٦۰	۰/۳۰۵	۰/۳۳۳	۰/۳۱۲

نتیجۀ نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و درنهایت، نتیجۀ نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص شد (جدول ٤)، که معیارهای افت سطح آب چاه‌های موجود در منطقه، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب بیشترین تأثیر را در فرونشست دشت اردبیل را داشته‌اند.

جدول ٤- وزن نهایی حاصل از روش ANP

معیار	فاصله از شهر و روستا	کاربری اراضی	فاصله از گسل	لیتولوژی	شیب	افت سطح آب	فاصله از رودخانه
وزن نهایی	۰/۱۲۷	۰/۱٤۷	۰/۱۲۳	۰/۱۵۲	۰/۰٦۱	۰/۲۲۱	۰/۱٦٦

پس از اعمال کردن وزن‌های حاصل از روش ANP در هر یک از نقشه‌های استاندارد شده و پیاده‌سازی دیگر مراحل مدل MABAC، نقشه نهایی پهنه‌بندی فرونشست در ۵ طبقۀ بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، به دست آمد (شکل ٦). با توجه به نتایج به دست آمده، ۲٤٤/۲۹ کیلومترمربع از مساحت شهرستان در طبقۀ بسیار پرخطر و ۳۷۰/۵۹ کیلومترمربع، در طبقه پرخطر قرار دارد. همچنین ۳۸۲/۷۵ کیلومترمربع از مساحت دشت، دارای خطر متوسط و به ترتیب ٤٤۱/۲٦ و ۲۸٦/۷۱ کیلومترمربع دارای خطر بسیار کم و کم می‌باشند (جدول ۵).



شکل ٦- نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل

جدول ٥- مساحت مربوط به هر یک از طبقات خطر

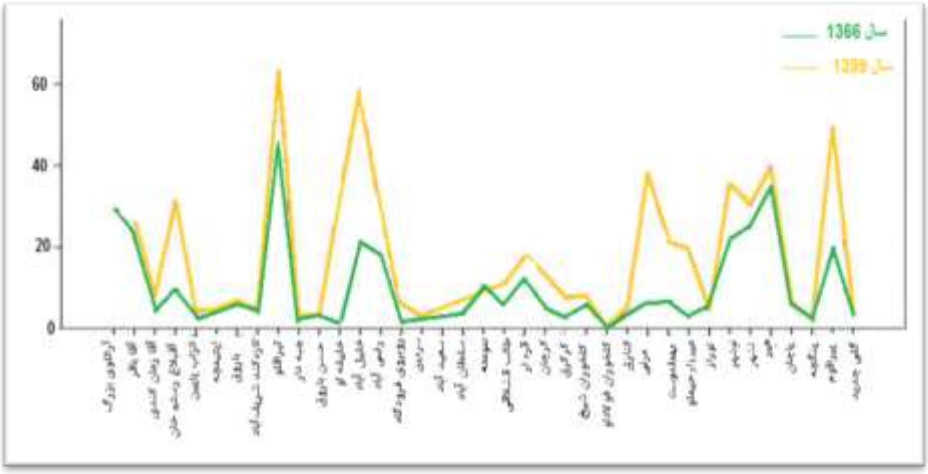
طبقه‌خطر	بسیار پرخطر	پر-خطر	خطرمتوسط	کم‌خطر	بسیارکم‌خطر
مساحت به کیلومترمربع	٢٤٤/٢٩	٣٧٠/٥٩	٣٨٢/٧٥	٤٤١/٢٦	٢٨٦/٧١
مساحت به درصد	١٤/٠٨	٢١/٤٧	٢٢/١٨	٢٥/٥٧	١٦/٦٣

طبق بررسی‌های انجام شده و نتایج به دست آمده ۳۵/۵۵ درصد از منطقه موردمطالعه در پهنه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. با بررسی و محاسبه موردی معیارهای تأثیرگذار بر فرونشست و پراکنش آن‌ها در پهنه بسیار پرخطر می‌توان بیان کرد که فاصله از رودخانه که طبق جدول (٤)، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین معیار در فرونشست منطقه موردمطالعه می‌باشد و هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم، نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم‌وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌ها، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. لذا ٤٢/٣٢ کیلومتر از منطقه بسیار پرخطر در فاصله ١٦٠٠٠ متری از رودخانه، ٧٦/٦٨ کیلومتر در فاصله ١٤٠٠٠ متری و ٦١/٧٦ کیلومترمربع در فاصله ١٢٠٠٠ متری از رودخانه قرار دارد. هر چه میزان فاصله به خطوط گسلی نزدیک‌تر باشد احتمال وقوع فرونشست افزایش می‌یابد و هر چه میزان فاصله از خطوط گسلی بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کم‌تری را برای احتمال فرونشست دارا می‌باشد.

۱۳٤/۷۱ کیلومتر از پهنه بسـیار پرخطر در فاصله ۵۰۰۰ متری از گسل، ۸۰/۹۸ کیلومتر در فاصله ۱۰۰۰۰ متری،۲۱/۳۵ کیلومتر در فاصـله ۱۵۰۰۰ متری و ۰/٦٦ کیلومتر در فاصـله ۲۰۰۰۰ متری از گسل قرار دارد. بیشترین احتمال وقوع فرونشـسـت در محدوده شـیب بین ۰ تا ۵ درصـد اتفاق می‌افتد زیرا این شیب نقش مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. ۱۲۷ کیلومتر از منطقه بسـیار پرخطر در محدوده شـیب ۰ تا ۱۵ درصد، ۸۱/۹ کیلومتر در شیب ۱۵ تا ۳۰ درصـد و ۳۵/۱ کیلومتر در محدوده شیب ۳۰ تا ٤٥ درصد قرار دارد. عوامل انسان‌ساخت مانند ابنیه‌های بزرگ و صـنعتی، تأسیسات زیرزمینی، عملیات حفاری، شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی با تحمیل بار وارده بر زمین، میزان آسـیب‌پذیری را افزایش داده و سـبب تشـدید فرونشـسـت می‌شـود به همین دلیل بیش‌ترین میزان فرونشـسـت در پهنه بسـیار پرخطر در فاصـله ۲۰۰۰۰ متری از شهر و روستا با ۱۳٤/۰۹ کیلومتر، در فاصـله ٤۰۰۰۰ متری از ۸۰/۲۰ کیلومتر، در فاصـله ٦۰۰۰۰ متری ۲۱ کیلومتر و در فاصـله ۸۰۰۰۰ متری ٦٦ کیلومتر قرار دارد. آبرفت‌های کواترنر که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیش‌ترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها را دارد، از رسـوبات آبرفتی تشـکیل شـده است که در مرکز و قسمت‌شرقی دشت بیش‌ترین میزان فرونشـسـت دیده می‌شـود و در سایر بخش‌ها به‌واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشـسـت بسـیار کم‌تر از سـایر بخش‌ها اسـت. رسـوبات جوان رودخانه‌ای و دشـت با ۱۲۹/٦۰ کیلومتر، مارن، کنگلومرا، توف، خاکسـتر، لاهار و تراس‌های قدیمی ۷٦/۳۷ کیلومتر، رسـوبات آهکی شـیرین و تراورتن، تناوب توف‌ها، سنگ‌آهک و مارن و ماسه‌سنگ توفی ۳۲ کیلومتر از مساحت پهنه بسیار پرخطر را شامل می‌شوند.

بررسـی معیار کاربری اراضـی حاکی از این موضـوع است که مناطق کشاورزی با ۲۷۸ کیلومتر، نواحی انسان‌ساز ۲٦۵/۹ کیلومتر، دیم‌زار ۸۸/۳ کیلومتر، مناطق آبی ۹۸/۸ کیلومتر، مراتع خوب ۱۵۵/٦ کیلومتر، مراتع متوسـط ۱۷۸/۸ کیلومتر، مراتع ضـعیف ٦۷/۲ کیلومتر، پوشـش گیاهی ۱۹۷/٤، مراتع متراکم ۹۹/۵ کیلومتر، باغات ۱٦۹/۳ کیلومتر و شهرک صنعتی ۱۳۲/۹ کیلومتر مساحت مناطق بسیار پرخطر تا کم خطر را به خود اختصاص داده است. مناطق دارای کاربری اراضـی کشـاورزی آبی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسـیل بالایی جهت وقوع فرونشـست دارد. همچنین مناطق سـکونت‌گاهی نیز به دلیل سـاخت‌وسـازها و وجود ابنیه‌های بزرگ و سـنگین مسـتعد وقوع فرونشـسـت هسـتند. با توجه به اینکه عمده محصـولات کشاورزی زیر کشت دشت اردبیل گندم، جو و سیب‌زمینی می‌باشـد که نیاز آبی بالایی برای رشـد دارند و کاهش چشم‌گیر بارندگی و کمبود منابع آب‌های سطحی در سال‌های اخیر لزوم استفاده از منابع آب‌های زیرزمین را بالا برده و همین مساله سبب افت بیش‌تر منابع آب زیرزمینی در منطقه شـده است. نتایج کاربری اراضی محدوده موردمطالعه و پراکنش فرونشست در این پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل

رشـد سـریع جمعیت و توسـعه صـنعت و کشـاورزی، تقاضـای آب نیز بسـیار زیاد می‌باشد. بااین‌حال بهره‌برداری بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی به دلیل کمبود منابع آب‌های سـطحی آشکار است که منجر به فرونشست زمین می‌شود و باعث آسیب به جاده‌ها، پل‌ها، لوله‌های آب زیرزمینی و سایر تأسیسات شهری می‌شود.



شکل ۷- تغییرات میانگین سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری دشت اردبیل

در دشــت اردبیل قبل از دهه ٦٠ و ٧٠ تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در مقایسه با چاه‌های دستی یا نیمه عمیق انگشــت‌شــمار بود. درنتیجه برداشــت از منابع آب زیرزمینی در حد محدود انجام می‌گرفته اســت. از سال ٦٨ به بعد اســتفاده از وســایل و دســتگاه‌های حفاری، تعداد چاه‌های حفر شــده در دشــت اردبیل رو به افزایش نهاد و با رونق کشـاورزی از دهه ٧٠ به بعد و به‌تبع آن افزایش بی‌رویه برداشــت از سفره مذکور شروع به افت سطح آب زیرزمینی کرد. تداوم این وضـعیت در سال‌های بعدی به‌خصوص از سال ١٣٨٥ به بعد باعث بحرانی شدن وضعیت این دشت از بابت افت سطح آب و فرونشست شده است. کاهش آبدهی چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها و تغییر محل و کف‌شکنی چاه‌ها و درنتیجه تحمیل هزینه‌ای گزاف در این خصــوص به صــاحبان چاه‌ها، افت کیفی منابع آب و شــور شــدن تدریجی، ایجاد محدودیت در مصــارف کشـاورزی، صـنعت و شـرب، نشـست‌زمین و کاهش ظرفیت حجم مخزن طبیعی از تبعات افت سـطح آب‌های زیرزمینی در دشــت اردبیل اســت. با اســتفاده از اطلاعات به دست آمده می‌توان گفت که قسمت شرقی و مرکزی دشت اردبیل بیش‌ترین تغییرات را به لحاظ افت سطح آب زیرزمینی داشته‌اند که به علت مسـاعد بودن شـرایط کشـاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا و تراکم چاه‌های عمیق حفر شــده، برداشــت از آب زیرزمینی در منطقه ذکر شــده فراوان بوده و به همین دلیل میزان افت ســطح آب‌های زیرزمینی بالا می‌باشـد. جهت بررسـی وضـعیت و تأثیر افت سـطح آب‌های زیرزمینی و تأثیر آن بر میزان فرونشست

دشت اردبیل از اطلاعات ۳۹ چاه پیزومتری (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای اردبیل)، طی سال‌های ٦٦ تا ۹۹ (شکل ۷)، که نتایج تحلیل از کاهش ٤۸ درصدی سطح ایستابی را در سال ۹۹ نسبت به سال ٦٦ نشان می‌دهد. بیشینه سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری از ٤٥ متر به بیش از ۷۰ متر در سال ۹۹ رسیده است که حاکی از وخامت اوضاع آبخوان دشت اردبیل است.

بررسی‌های زمینی مؤید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین در دشت اردبیل می‌باشد. ازجمله می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل (شکل ۸) و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های شهر اردبیل اشاره کرد و ترک‌هایی که در روی زمین‌های کشاورزی شکل گرفته سبب توسعه فرسایش شده است. به‌گونه‌ای که این درز و ترک‌ها باعث کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی و از بین رفتن آن‌ها و آسیب به سیستم آبیاری شده است.



شکل ۸- ترک‌های شکل گرفته ناشی از فرونشست در دشت اردبیل

٤- جمع‌بندی

در این پژوهش خطر فرونشست در دشت اردبیل، با استفاده از تلفیق روش‌های ANP وMABAC، موردبررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد، عوامل افت سطح آب (جزو عوامل هیدرو اقلیمی)، فاصله از آبراهه (جزو خوشه عوامل هیدرو اقلیمی)، لیتولوژی (جزو خوشه زمین‌ساختی)، به ترتیب با مقدار ۰/۲۲۱، ۰/۱٦٦، ۰/۱٥۲، بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. فرزین کیا و همکاران (۱٤۰۰)، نیز در مطالعه‌ای که در آن به پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت جوین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای – فازی پرداخته‌اند؛ سطح چاه‌های پیزومتری، تراکم چاه‌ها و فاصله از رودخانه را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل بیان کرده‌اند. شایان و همکاران (۱۳۹٥)، در مطالعه‌ای با عنوان پهنه‌بندی خطر فرونشست در حوضه‌ای آبخیز قره‌چای همدان به این نتیجه رسیدند که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع

فرونشست در منطقه بوده و عوامل لیتولوژیکی و انسانی به‌تنهایی نقش ندارند. با توجّه به بررسی نقش و اهمّیّت هر یک از عوامل دخیل در شکل‌گیری فرونشست و نیز نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تحقیق و تجزیه‌وتحلیل نهایی با استفاده از روش ماباک، به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، به ترتیب ٢٤٤/٢٩ و ٣٧٠/٥٩ کیلومترمربع از محدوده مطالعاتی در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. با توجه به نقشهٔ پهنه‌بندی فرونشست، دشت اردبیل دارای احتمال خطر بالا، مناطق بسیار پرخطر، به‌طور عمده در شیب ٠ تا ١٥ درصد، سازندهای نامقاوم و نیمه‌مقاوم، که عمدتاً سازندهای سست کواترنری (رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، لاهار، مارن)، کاربری‌های زراعی، انسان‌ساخت و مراتع، محدوده چاه‌های پیزومتری و عمیق، محدوده نزدیک گسل و در مناطق با فواصل دور از آبراهه‌ها قرار دارند. همچنین می‌توان گفت که نتایج حاصل از این مطالعه، حاکی از توان بالای دشت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشست می‌باشد. لذا قلمروهای پرخطر تعیین شده در این پژوهش اراضی هستند که نباید کارهای غیر اصولی از قبیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، کاشت محصولات با نیاز آبی بالا انجام گیرد. همچنین این امر نیازمند شناسایی عوامل تأثیرگذار، اقدامات کاهش‌دهنده و اقدامات تطبیق دهنده ازجمله محدود یا ممنوعیت استخراج آب‌های زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و اجرای مقررات سخت‌گیرانه جهت استخراج‌کنندگان منابع آب زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و پایش پیوسته شاخص‌های فرونشست است. به‌طورکلی ایجاد چنین شرایط و وضعیتی در رویداد پدیده فرونشست و پیامدهای مخاطره‌آمیز و فاجعه‌بار آن برای کشور، قبل از هر چیزی عزم ملی برای پذیرش و مقابله با این پدیده به‌عنوان یک معضل و مخاطره منتهی به یک فاجعه را طلب می‌نماید. موضوعی که درک آن از یک سو مستلزم افزایش مطالعات برای شناسایی کامل نواحی مستعد به‌صورت یک طرح ملی است. از طرفی لازم است زیرساخت لازم برای آگاهی‌رسانی و همگانی بودن اطلاع از نتایج و معضلات ناشی از این مسئله برای مردم در جهت مشارکت آن‌ها در جهت جلب مشارکت مردم و مسئولان و تعدیل زیرساخت‌های ایجابی فراهم گردد؛ و نهایتاً برای پیشگیری و کاهش و تعدیل حجم دامنه فاجعه محتمل از این مخاطره، دستگاه‌های ذی‌ربط تمامی مقررات و استانداردهای لازم ساخت‌وساز را برای نواحی در معرض فرونشست، موردبازنگری قرارداده و اساس را بر شرایط نوین تعریف نماید. درنهایت می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومهٔ آن، در محدوده موردمطالعه آسیب برساند، ازاین‌رو، بایستی راهکارهای بلندمدت به‌صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب و راهکارهای کوتاه‌مدت به‌صورت، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی به اشکال مختلف و پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده، ایجاد سدهای زیرزمینی به‌منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، تهیه و نصب دستگاه‌های کنتور

هوشـــمند، ایجاد تشـــکل‌های آب‌بران و حمایت از این تشـــکل‌ها، ایجاد و اســـتقرار بازار محلی آب و ســـاماندهی شـــرکت‌های حفاری، کنترل شـــدید مصـــرف آب، فرهنگ‌ســـازی مصرف و تغییر الگوی مصرف، موردتوجه مسئولان مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

کتابنامه

آ میغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش؛ ۱۳۸۸. بررسی فرونشست یزد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ترازیابی دقیق. *طرح پژوهشی سازمان نقشه‌برداری کشور*. صص ٤٦-۱. https://sid.ir/paper/32299/fa

ابراهیمی، عطرین؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *فصلنامه جغرافیا و روابط انسانی*. دوره ۲. شماره ٤. صص ۲۹-٤۱ https://dorl.net/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1

بهیاری، مهدی؛ علیزاده، اکرم؛ محمودیان، شهاب؛ ۱۳۹٦. ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. دوره ۷. شماره ۲. صص ٥٦-٤۹. https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229

جوادی، سید محمدرضا؛ ۱٤۰۰. *برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان – بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS*. رساله دکتری. دانشگاه تبریز. استاد راهنما دکتر معصومه رجبی. صص ۱٥٦-۱.

حاجب، زهرا؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ رضایی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۷. بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری. *مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*. صص ۳٥٥- ۳٥۲. https://sid.ir/paper/31521/fa

حسین‌آبادی، سعید؛ اکبری، ابراهیم؛ نقد بیشی، ابراهیم؛ ۱۳۹۹. ارزیابی و شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از طبقه‌بندی شیءگرا و مدل زنجیره مارکوف (موردمطالعه: شهر بیرجند و پیرامون آن). *نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی*. شماره سی و سوم. صص ۱۸۸-.۱٦۹. https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81819

رستم زاده، هاشم؛ اسدی، اسماعیل؛ جعفرزاده، جعفر؛ ۱۳۹٤. بررسی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. سال دوم. شماره یک. صص ٤۲-۳۱. https://sid.ir/paper/264771/fa

زارعی، کیوان؛ رسول‌زاده، علی؛ صدیقی، مرتضی؛ احمدزاده، غلامرضا؛ رمضانی مقدم، جواد؛ ۱۳۹۹. تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس). *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*. سال یازدهم. شماره چهل و یکم. صص ۱-۱٥ https://www.magiran.com/paper/2180181

شادفر، صمد؛ نصیری، اسماعیل؛ چیتگر، سکینه؛ احمدی، علی؛ ۱۳۹٤. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مطالعه موردی: بوئین شهر. *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*. سال دوازدهم. شماره ٤۸. صص ۱۸-۱. https://sid.ir/paper/116305/fa

شاه کرمی، نازنین؛ قاسمی، شبنم؛ ۱۳۹۹. مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی در دشت اراک. چهارمین مجمع توسعه فناوری و کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین عمران معماری و صنعت ساختمان ایران. صص ۱۳-۱ .
https://civilica.com/doc/1031421

شایان، سیاوش؛ یمانی، مجتبی؛ یادگار، منیژه؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان. *هیدروژئومورفولوژی*. شماره ۹. صص ۱۵۸-۱۳۹. https://sid.ir/paper/520002/fa

شریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنج راداری در دشت نوق- بهرامان. *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. دوره شانزده. شماره سوم. صص ۷۳-۵۵.
http://hsmsp.modares.ac.ir/article-٥٠٧٦-٢١fa.html

شفیعی، نجمه؛ گلی مختاری، لیلا؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. صص ۱۱۱-۹۳
https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.106424

شمشکی، امیر؛ بلورچی، محمدجواد؛ انصاری، فرهاد؛ ۱۳۸٤. *بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار*. طرح پژوهشی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. شماره گزارش ۲۰/۰٦-۸٤ Engeo صص ۸٤-۱.
https://gsi.ir/fa

شمشکی، امیر؛ بلوری محمدجواد؛ انتظام سلطانی ایمان؛ ۱۳۹٤. فرونشست زمین در شهر تهران و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین. صص۱۲-۱. https://civilica.com/doc/210280

عابدینی، موسی؛ آقایاری، لیلا؛ اصغری سکانرود؛ ۱٤۰۱. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی:دشت اردبیل). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. سال یازدهم. شماره ۱. تابستان ۱٤۰۱ صص. ۱۳۲ – ۱۱۷.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1401.11.1.7.9

عابدینی، موسی؛ خان بیگی، علی؛ موس پور، توحید؛ حسین دانشور؛ ۱۳۹۵. تعیین مناطق احتمالی فرونشست دشت روانسر- سنجابی با استفاده از GIS و AHP. دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری. شرکت کیان تایر و جهاد دانشگاهی آذربایجان شرقی. https://civilica.com/doc/526049

عابدینی، موسی؛ ۱۳۸۸. بررسی مسائل هیدروژئومورلوژی و فرونشست ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل و راهکارها. دانشگاه محقق اردبیلی. *مجموعه مقالات*. https://civilica.com/doc/335178

عابدینی، موسی؛ ۱۳۹۲. بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر. *فصلنامه علمی- پژوهشی. جغرافیای طبیعی. شماره ۱۹. صص ۸٤-۷۱.* https://sid.ir/paper/184972/fa

عابدینی، موسی؛ پیروزی، الناز؛ شکرزاده، الهام؛ ۱٤۰۰. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه‌ی موردی: شهرستان نیر). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال دهم. شماره ۲. تابستان ۱٤۰۰ صص ۱۵۵-۱۳٦. https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.215108.1214

عابدینی، موسی؛ ١٣٩٦. *مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفولوژی و مدیریت محیط)*. انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی. چاپ یکم. ٢٣٠ صفحه.

عالی‌پور اردی، مهدی؛ ملک محمدی، بهرام؛ جعفری، حمیدرضا؛ ١٣٩٦. پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. سال ١١. شماره ٣٨. صص ٣٤-٢٥. https://sid.ir/paper/134810/fa

فتح‌الله، نرگس؛ آخوندزاده؛ مهدی؛ بحرودی، عباس؛ ١٣٩٧. بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*. دوره ٢٧. شماره ١٠٥. صص ٣٤-٢٤ https://civilica.com/doc/795768

فرزین‌کیا، ربابه؛ امیر احمدی، ابوالقاسم؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ زندی، رحمان؛ ١٤٠٠. پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت جوین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای – فازی. *فصلنامه علمی فضایی جغرافیایی دانشگاه آزاد* اهر. سال بیست و یکم. شماره ٧٣. صص ٧١-٥١.
https://www.sid.ir/fileserver/jf/40014007404.pdf

فرجی سبکبار، حسنعلی؛ بدری، سید علی؛ مطیعی، سیدحسن؛ شرفی، حجت‌الله؛ ١٣٨٩. سنجش میزان پایدار نواحی روستایی بر مبنای مدل تحلیل شبکه، با استفاده از تکنیک بردا مطالعه موردی: نواحی روستایی شهرستان فسا. *پژوهش‌های جغرافیای انسانی* تابستان ١٣٨٩ شماره ٧٢. http://ensani.ir/fa/article/260904

فنی، زهره؛ فشمی، سید محمدرضا؛ ١٣٩٦. پهنه‌بندی و تحلیل فضایی مخاطرات چهارگانه محیطی زمین‌لغزش، سیل، زلزله و فرونشست موردپژوهشی: مناطق ٢٢ گانه شهر تهران. *فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*. دوره ٢٧ شماره ١٠٨. صص ١٤-١. 10.22131/sepehr.2019.34621

فیض‌زاده، بختیار؛ هلالی، حسین؛ ١٣٨٩. مقایسه روش‌های پیکسل پایه، شیءگرا و پارامترهای تأثیرگذار در طبقه‌بندی پوشش کاربری اراضی استان آذربایجان غربی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. سال چهل و دوم. شماره ٧١. صص ١١٧-١٠٧. https://jphgr.ut.ac.ir/article_21550.html

کوه بنانی، حمیدرضا؛ یزدانی، محمدرضا؛ حسینی، سید کیوان؛ ١٣٩٨. پهنه‌بندی گسترهٔ خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل‌آباد). *مدیریت بیابان*. ٧ (١٣). صص ٦٥-٧٦. https://sid.ir/paper/252819/fa

کیانی، فاطمه؛ عابدینی، موسی ؛ غلامرضا احمدزاده؛ ١٣٩٦. بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS. تهران. سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر. معماری و مدیریت شهری بین‌المللی. https://civilica.com/doc/688569

محمودی، پیمان؛ علیجانی، بهلول؛ ١٣٩٢. مدل‌بندی رابطه بارش‌های سالان و فصلی با عوامل زمین اقلیم در کردستان. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. سال ١٣. شماره ٣١. صص ١١٢-٩٣
http://jgs.khu.ac.ir/article-١٦٧٩-١-fa.html

مدنی، حسن؛ شفیقی، سیروس؛ ١٣٩٦. *زمین‌شناسی عمومی*. انتشارات دانشگاه امیرکبیر. ٤٨٢ ص.

منتظریون، مریم؛ اصلانی، فرشته؛ ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*. دوره نهم. شماره اول. صص ۱۳-۱.
DOI:20.1001.1.23225955.1398.9.1.3.2

Abdulaziz, Aljammaz, Sultan, Mohamed, Izadi, Moein, Abotalib Abotalib Z., 2021. Land Subsidence Induced by Rapid Urbanization in Arid Environment5455s: A Remote Sensing-Based Investigation, A Remote Sensing-Based Investigation, p1-24. https:// doi.org/ 10.3390/ rs13061109

Aher, P. Adinarayana, J.; and Gorantiwar, SD., 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. Agric Eng Int CIGR J, 15(1):11–18 http://www.cigrjournal.org

Alizadeh, R; Izadi, H; Arasteh,M., (2021). Ranking of nature-based tourism capacity in mountainous areas, case study: Eastern region of Lorestan province. Planning and arranging space. 25 (1): 117-142. https://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-46361-en.html

Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., Cerda. A., (2018), Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717325615

Bou kheir, R.; Cerdan, O.; and Abdelah, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. Geomorphology, 82: 347-359. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.012

Chaofan, Zhou, Huili, Gong, Beibei, Chen, Mingliang, Gao, Qun, Cao, Jin, Cao, Li Duan, Junjie, Zuo, Min, Shi,2019. Land Subsidence Response to Di_erent Land Use. Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China, Remote Sens, pp1-22.10.3390/rs12030457

Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the ebro valley evaporate karst (NE Spain). Geomorphology,111(3),160-172 https:// doi.org/ 10.1016/ j.geomorph.2009.04.017

Galve, j.p. Gutierrez, f., Remondo, j., Bonachea, J., Lucha, p., Cenrero,A.2009.

Gambolati, and Massimillano, F, Teatro. F., 2006. AnthropogenicLandSubsidence, GROUNDWATER. DOI: 10.1002, PP 2444-2457.

Georgiou, D.; Mohammed, E.S.; and Rozakis, S., 2015. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. Renew. Energy, 75: 459–467. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.036

Guoman Huang, Haitao Fan, Lijun Lu, Wenqing Yu., 2020. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-pp 1-6.

Hoseini H., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, Information Processing in Agriculture, 6 (1): 11-19
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317318302208

Hwang, c., Yang, y., kao, R., Han, j., Hung, W.C., Cheng s., Li, f., 2016. Time varying land subsidence detected by radar altimetry; California Taiwan and north china, scientific reports. 6: 28160 https://doi.org/10.1038/srep28160

Qui T, Nguyen., 2016. Sustainable Development of Civil, Urban and Transportation Engineering ConferenceThe Main Causes of Land Subsidence in Ho Chi Minh City, Procedia Engineering, 142, pp 33. https://cyberleninka.org/article/n/584825

Raucooules, D, Colesanti, C, Carnec Carnec, C., 2007. Use of SAR interferomet for detectingand assessing ground subsidence, C.R, Geoscience 339, 289-302 https:// doi.org/ 10.1016/j.crte.2007.02.002.

Stephen, A, Nelson., 2016. Surface Subsidence and Collapse, Natural Disasters, on 03.PP1-10.